

INTERPRETAÇÃO DA ARQUITETURA DO PERFIL POR MEIO DAS TENDÊNCIAS MÉDIA, LINEAR, QUADRÁTICA E CÚBICA EM UM LATOSSOLO VERMELHO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NO CERRADO BRASILEIRO

INTERPRETATION OF SOIL PROFILE ARCHITECTURE THROUGH MEAN, LINEAR, QUADRATIC, AND CUBIC TRENDS IN A RHODIC FERRALSOL UNDER DIFFERENT MANAGEMENT SYSTEMS IN THE BRAZILIAN CERRADO

Isaias da Silva Pereira¹

RESUMO: A avaliação dos impactos do manejo sobre a arquitetura no perfil do solo pode ser mensurada pelo comportamento dos coeficientes dos macroagregados, diâmetro médio ponderado e carbono orgânico ao longo do perfil. Objetivou-se interpretar a arquitetura do perfil de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado brasileiro, utilizando as tendências média (p_0), linear (p_1), quadrática (p_2) e cúbica (p_3) de macroagregados, diâmetro médio ponderado (DMP) e carbono orgânico. Foram analisados dados obtidos nas profundidades de 0–5, 5–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm sob Cerrado nativo, eucalipto, pastagem, plantio direto, grade pesada e arado de discos. As trajetórias verticais dos indicadores foram descritas por regressão polinomial ortogonal. A integração das tendências revelou arquiteturas distintas entre os sistemas, inclusive quando suas condições médias foram semelhantes. Os sistemas de menor perturbação mecânica apresentaram maior continuidade entre organização estrutural, estabilidade da agregação e componente orgânico, enquanto o revolvimento recorrente promoveu maior diferenciação das trajetórias em profundidade. A grade pesada evidenciou a influência da interrupção do revolvimento e do período de pousio sobre a reorganização estrutural, enquanto o arado de discos apresentou a maior expressão da interferência mecânica sobre a organização vertical dos macroagregados. As tendências polinomiais permitiram, portanto, distinguir a condição média, a direção, a curvatura e as inflexões das trajetórias dos indicadores, evidenciando que sistemas com valores médios semelhantes podem apresentar arquiteturas distintas. A arquitetura do perfil refletiu a natureza, a intensidade, a duração e a sucessão das intervenções de manejo, expressando o solo como um sistema dinâmico em contínua transformação e ajuste às condições ambientais.

Palavras-chave: agregação do solo. carbono orgânico. estrutura do solo. manejo do solo. perfil do solo. regressão polinomial.

¹ Docente do Colégio Técnico de Floriano da Universidade Federal do Piauí. Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa, Área Sanitária e Ambiental. Graduado em Engenharia Agrônoma pela Universidade Federal de Viçosa.

ABSTRACT: The impacts of management on soil profile architecture can be assessed through the behavior of macroaggregate, mean weight diameter, and organic carbon coefficients throughout the profile. This study aimed to interpret the profile architecture of a **Rhodic Ferralsol** under different management systems in the Brazilian Cerrado using the mean (p_0), linear (p_1), quadratic (p_2), and cubic (p_3) trends of macroaggregates, mean weight diameter (MWD), and organic carbon. Data from the 0–5, 5–10, 10–20, 20–30, and 30–40 cm soil layers were analyzed under native Cerrado, eucalyptus, pasture, no-tillage, heavy disk harrowing, and disk plowing. The vertical trajectories of the indicators were described by orthogonal polynomial regression. The integration of the polynomial trends revealed distinct profile architectures among management systems, even when their mean conditions were similar. Systems subjected to less mechanical disturbance showed greater continuity between structural organization, aggregate stability, and the organic component, whereas recurrent soil tillage promoted greater differentiation of trajectories with depth. Heavy disk harrowing reflected the influence of tillage interruption and the subsequent fallow period on structural reorganization, whereas disk plowing showed the strongest expression of mechanical interference with the vertical organization of macroaggregates. Thus, polynomial trends distinguished the mean condition, direction, curvature, and inflection points of the indicator trajectories, demonstrating that systems with similar mean values may exhibit distinct profile architectures. Soil profile architecture reflected the nature, intensity, duration, and succession of management interventions, revealing soil as a dynamic system undergoing continuous transformation and adjustment to environmental conditions.

Keywords: soil aggregation. organic carbon. soil structure. soil management. soil profile. polynomial regression.

RESUMEN: La evaluación de los impactos del manejo sobre la arquitectura del perfil del suelo puede realizarse mediante el comportamiento de los macroagregados, el diámetro medio ponderado y el carbono orgánico a lo largo del perfil. El objetivo fue interpretar la arquitectura del perfil de un Latossolo Vermelho bajo diferentes sistemas de manejo en el Cerrado brasileño, utilizando las tendencias media (p_0), lineal (p_1), cuadrática (p_2) y cúbica (p_3) de los macroagregados, el diámetro medio ponderado (DMP) y el carbono orgánico. Se analizaron datos obtenidos en las profundidades de 0–5, 5–10, 10–20, 20–30 y 30–40 cm bajo Cerrado nativo, eucalipto, pastura, siembra directa, rastra pesada y arado de discos. Las trayectorias verticales de los indicadores se describieron mediante regresión polinómica ortogonal. La integración de las tendencias reveló arquitecturas distintas entre los sistemas, incluso cuando sus condiciones medias fueron semejantes. Los sistemas con menor perturbación mecánica presentaron mayor continuidad entre la organización estructural, la estabilidad de la agregación y el componente orgánico, mientras que la labranza recurrente promovió una mayor diferenciación de las trayectorias con la profundidad. La rastra pesada evidenció la influencia de la interrupción de la labranza y del período de barbecho sobre la reorganización estructural, mientras que el arado de discos presentó la mayor expresión de la interferencia mecánica sobre la organización vertical de los macroagregados. Por lo tanto, las tendencias polinómicas permitieron distinguir la condición media, la dirección, la curvatura y las inflexiones de las trayectorias de los indicadores, evidenciando que sistemas con valores medios semejantes pueden presentar arquitecturas distintas. La arquitectura del perfil reflejó la naturaleza, la intensidad, la duración y la sucesión de las intervenciones de manejo, expresando el suelo como un sistema dinámico en continua transformación y ajuste a las condiciones ambientales.

Palabras clave: agregación del suelo. carbono orgánico. estructura del suelo. manejo del suelo. perfil del suelo. regresión polinómica.

1. INTRODUÇÃO

O perfil do solo constitui o registro vertical dos processos responsáveis por sua formação e das transformações impostas pelo uso e manejo ao longo do tempo. Essa organização não é uniforme nem estática: partículas minerais, matéria orgânica, agregados, poros, raízes e organismos estabelecem relações que variam entre as camadas e se reorganizam continuamente em resposta às condições ambientais e às intervenções antrópicas. A estrutura do solo representa, nesse contexto, o arranjo espacial das partículas e dos poros associados, e sua formação, estabilização ou degradação resulta da atuação conjunta de processos físicos, químicos e biológicos (Oades, 1993; Bronick; Lal, 2005).

Nos Latossolos do Cerrado, essa organização assume particular importância em razão do elevado grau de intemperismo e da participação dos constituintes minerais na formação e estabilização da estrutura. A agregação envolve mecanismos de rearranjo, floculação e cimentação das partículas, mediados pela fração mineral, carbono orgânico e atividade biológica, tornando a estrutura sensível às alterações promovidas pelo uso e manejo (Bronick; Lal, 2005). A interação entre estrutura, carbono, raízes e atividade biológica estabelece relações dinâmicas nas quais a estrutura condiciona o ambiente do solo e, simultaneamente, é modificada pelos processos que nele ocorrem (Oades, 1993; Hartmann; Six, 2023).

As intervenções de manejo atuam com maior intensidade a partir da superfície, onde se concentram o revolvimento, o tráfego, a deposição de resíduos e parte expressiva da atividade radicular, mas seus efeitos podem assumir trajetórias distintas em profundidade. Em solos do Cerrado brasileiro, mudanças no uso e manejo modificam a distribuição vertical do carbono orgânico, demonstrando que a posição no perfil constitui uma dimensão importante da resposta do solo às intervenções agrícolas (Corazza et al., 1999; Zinn et al., 2005). Sistemas submetidos a diferentes intensidades de perturbação podem, portanto, apresentar não apenas diferentes magnitudes dos atributos, mas diferentes padrões de distribuição ao longo do perfil. Essa questão torna-se particularmente relevante quando são considerados conjuntamente componentes relacionados à organização estrutural, à estabilidade dos agregados e ao carbono orgânico. A avaliação por médias ou pela comparação de profundidades discretas permite identificar diferenças entre tratamentos e camadas, mas não necessariamente revela a forma assumida pela trajetória dos atributos no perfil. Sistemas com condições médias semelhantes

podem apresentar comportamentos verticais distintos, uma vez que determinado atributo pode diminuir ou aumentar em profundidade, modificar progressivamente essa trajetória ou apresentar inflexões entre as camadas. Neste estudo, essa organização é interpretada como arquitetura do perfil, compreendida como o arranjo vertical expresso pela organização dos constituintes minerais e orgânicos e pela estabilidade das unidades estruturais ao longo da profundidade, continuamente modificado pelos processos naturais e pelas intervenções de manejo. Os macroagregados são utilizados como expressão da organização estrutural; o diâmetro médio ponderado (DMP), como indicador da estabilidade da agregação; e o carbono orgânico, como componente relacionado aos processos biológicos e organominerais envolvidos na formação e estabilização da estrutura. Nenhum desses indicadores, isoladamente, representa a arquitetura do perfil; sua interpretação resulta da integração de suas trajetórias verticais.

Essa perspectiva pode ser explorada por meio de regressões polinomiais ortogonais. Os dados originalmente obtidos por Pereira (1997) foram analisados pelo programa Profile, que permite decompor matematicamente o comportamento das variáveis em profundidade em componentes polinomiais independentes. O procedimento utiliza os parâmetros p_0 , p_1 , p_2 e p_3 , associados à condição média e às tendências linear, quadrática e cúbica, respectivamente, conforme o procedimento descrito por Colwell (1978) e posteriormente empregado em estudos de solos do Cerrado (Ferreira et al., 2007).

Neste estudo, avança-se da descrição matemática das tendências para sua interpretação pedológica integrada. A tendência média (p_0) expressa a condição média dos indicadores no perfil; a linear (p_1), a direção predominante de suas trajetórias; a quadrática (p_2), a curvatura ou modificação dessa direção; e a cúbica (p_3), as inflexões ao longo da profundidade. Esses componentes não constituem medidas diretas da arquitetura, mas descrevem matematicamente o padrão vertical dos indicadores utilizados para interpretá-la. Sua integração permite investigar como organização estrutural, estabilidade da agregação e carbono orgânico se relacionam ao longo do perfil e como essas trajetórias respondem aos diferentes históricos de manejo. O trabalho teve como objetivo interpretar a arquitetura do perfil de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado brasileiro, utilizando as tendências média, linear, quadrática e cúbica de macroagregados, diâmetro médio ponderado e carbono orgânico como descritores de sua organização vertical.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo e sistemas de manejo

Os dados utilizados foram obtidos por Pereira (1997) em experimento de longa duração conduzido no campo experimental da Embrapa Cerrados, em Planaltina, Distrito Federal, região do Cerrado brasileiro. O solo foi classificado originalmente como Latossolo Vermelho-Escuro argiloso, denominação vigente à época do estudo.

Foram avaliados seis sistemas com históricos contrastantes de uso e perturbação: Cerrado nativo (CE), eucalipto (EUC), pastagem de *Brachiaria decumbens* (PAST), plantio direto (PD), grade pesada (GP) e arado de discos (AD). O CE representou a condição sem revolvimento; o EUC, cobertura florestal cultivada sem mobilização periódica; e a PAST, implantada em 1976, permaneceu predominantemente sob *B. decumbens* e pastejo intensivo, com intervenções agrícolas pontuais e ausência posterior de adubação de manutenção (Pereira, 1997).

O PD sucedeu o preparo convencional inicial e foi mantido predominantemente sem revolvimento, com sucessão de culturas. A GP foi utilizada durante dez anos na sucessão soja-trigo irrigado, seguida por três anos de pousio e recolonização por *B. decumbens*. O AD apresentou mobilização mecânica recorrente, inclusive nos anos próximos à amostragem. Esses históricos representam condições contrastantes de conservação, perturbação e posterior reorganização do solo e foram considerados na interpretação das trajetórias dos indicadores ao longo do perfil (Pereira, 1997).

2.2 Amostragem e determinações

As amostras foram coletadas nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm, conforme Pereira (1997). Para este estudo foram utilizados o percentual de macroagregados, o diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) e o carbono orgânico.

Os macroagregados foram utilizados como expressão da organização estrutural, o DMP como indicador da estabilidade da agregação e o carbono orgânico como componente associado aos processos de formação e estabilização da estrutura. A arquitetura do perfil não foi atribuída isoladamente a nenhum desses indicadores, mas interpretada pela integração de suas trajetórias em profundidade.

2.3 Análise estatística e interpretação das tendências

A distribuição dos indicadores ao longo do perfil foi analisada por regressão polinomial ortogonal utilizando o programa Profile, conforme Colwell (1978). O mesmo procedimento foi posteriormente empregado por Ferreira et al. (2007) para análise de atributos em cinco profundidades de Latossolo no campo experimental da Embrapa Cerrados.

Foram considerados os pontos médios das camadas avaliadas, correspondentes às profundidades de 2,5; 7,5; 15; 25 e 35 cm. A variação das propriedades do solo ao longo do perfil foi analisada por meio de polinômios ortogonais, ajustando-se o modelo:

$$Y = p_0 + p_1\xi_1 + p_2\xi_2 + p_3\xi_3$$

em que Y representa a variável resposta (percentual de macroagregados, diâmetro médio ponderado ou carbono orgânico); p_0 corresponde à condição média da variável considerando simultaneamente todas as profundidades; ξ_1 , ξ_2 e ξ_3 representam, respectivamente, os componentes linear, quadrático e cúbico da distribuição vertical; e p_1 , p_2 e p_3 correspondem aos coeficientes ortogonais associados a cada componente do modelo. A ortogonalidade permite estimar separadamente os componentes linear, quadrático e cúbico da variação ao longo do perfil (Colwell, 1978; Ferreira et al., 2007).

O componente linear (p_1) foi interpretado como o gradiente vertical da propriedade avaliada, descrevendo sua taxa de aumento ou redução ao longo do perfil. Os componentes quadrático (p_2) e cúbico (p_3) foram empregados para caracterizar alterações de curvatura e inflexões da distribuição vertical das variáveis, permitindo identificar diferentes padrões de resposta associados aos sistemas de manejo.

As diferenças entre os sistemas foram avaliadas pelo teste t a 10% de probabilidade, conforme Pereira (1997). Para a interpretação da arquitetura do perfil, p_0 expressou a condição média dos indicadores; p_1 , a direção predominante da trajetória vertical; p_2 , sua curvatura; e p_3 , as inflexões em profundidade. Os coeficientes polinomiais não foram considerados medidas diretas da arquitetura, mas descritores matemáticos das trajetórias de macroagregados, DMP e carbono orgânico utilizadas para interpretá-la.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A arquitetura do perfil foi interpretada como a organização vertical resultante do arranjo e das interações entre os componentes minerais e orgânicos do solo, cuja expressão pode ser modificada pela natureza, intensidade e duração do manejo. Neste estudo, os macroagregados foram considerados indicadores da organização estrutural, o diâmetro médio ponderado (DMP) da estabilidade dessa agregação e o carbono orgânico como componente associado à formação e estabilização dos agregados por processos biológicos e interações organominerais. Esses indicadores não representam isoladamente a arquitetura, mas, quando analisados conjuntamente ao longo das profundidades, permitem interpretar sua organização no perfil.

As tendências polinomiais foram utilizadas como descritores matemáticos desse padrão vertical, e não como medidas diretas da arquitetura. A tendência zero (p_0) expressa a condição média dos indicadores no conjunto das profundidades; a tendência linear (p_1), a direção predominante de suas trajetórias; a tendência quadrática (p_2), as modificações dessa direção ao longo do perfil; e a tendência cúbica (p_3), as inflexões sucessivas entre as camadas. A interpretação conjunta dessas tendências permite identificar convergências e disjunções entre organização, estabilidade e componente orgânico e relacioná-las ao histórico de cada sistema, distinguindo trajetórias construídas predominantemente por processos biológicos e organominerais daquelas modificadas pela perturbação mecânica.

7

3.1 Tendência zero (p_0): condição média da arquitetura do perfil

A tendência zero distinguiu condições médias da arquitetura associadas aos sistemas de manejo. Cerrado e eucalipto apresentaram as condições mais próximas da referência de conservação estrutural. No Cerrado, a elevada expressão conjunta dos indicadores caracteriza o perfil sob vegetação natural e ausência de perturbação mecânica recorrente. O eucalipto manteve resposta estrutural próxima à do Cerrado, embora com menor conteúdo médio de carbono orgânico, indicando que a organização do perfil não acompanha necessariamente, na mesma proporção, a magnitude absoluta do carbono. Essa resposta evidencia que a conservação estrutural depende da associação entre os componentes do sistema solo e não da superioridade isolada de um único indicador.

Pastagem e plantio direto apresentaram condições modificadas pelo uso agrícola, mas preservaram componentes importantes da organização do perfil. A pastagem manteve elevada expressão da macroagregação associada a valores intermediários de carbono orgânico, enquanto o plantio direto apresentou maior conservação do carbono sem resposta estrutural de mesma magnitude. Esse contraste mostra que diferentes sistemas podem conservar componentes distintos da arquitetura e reforça que a condição do perfil não pode ser inferida a partir de um único atributo.

A grade pesada apresentou comportamento particularmente relevante. Apesar do elevado potencial de perturbação associado ao preparo intensivo, sua condição média aproximou-se daquela dos sistemas menos perturbados; CE, EUC e GP integraram o grupo de maiores percentuais médios de macroagregados. Esse resultado deve ser interpretado considerando a trajetória da área. Entre 1982 e 1992, foram realizados cultivos sucessivos de soja no período chuvoso e trigo irrigado na estação seca, após descompactação inicial e adubação corretiva. Posteriormente, o cultivo foi interrompido e a área permaneceu três anos em pousio, sendo colonizada por *Brachiaria decumbens*. Assim, p_0 expressa a condição encontrada após uma sequência de perturbação mecânica prolongada seguida pela interrupção do revolvimento e estabelecimento de cobertura vegetal, e não apenas o potencial perturbador da grade pesada.

8

O arado de discos apresentou a maior alteração da condição média do perfil. Esse sistema apresentou o menor percentual médio de macroagregados (91,74%), em contraste com aproximadamente 96,20% no grupo formado por CE, EUC e GP. A mobilização recorrente esteve associada à redução da estabilidade estrutural e à modificação da organização mantida nos sistemas de menor perturbação. Na perspectiva adotada neste estudo, esse resultado representa uma alteração da associação entre os componentes estruturais e orgânicos que definem a condição média do perfil, e não simplesmente a redução isolada de determinado atributo.

A tendência zero mostrou, portanto, que os sistemas estabeleceram condições médias distintas da arquitetura do Latossolo Vermelho. Cerrado e eucalipto mantiveram maior conservação estrutural; pastagem e plantio direto preservaram componentes distintos dessa organização sob uso agrícola; o arado de discos apresentou a maior alteração; e a grade pesada evidenciou que a condição atual do perfil incorpora também sua trajetória recente de manejo. O resultado central de p_0 não reside na ordenação individual de macroagregados, DMP ou carbono

orgânico, mas na coerência com que esses indicadores expressam conjuntamente o estado do perfil sob cada manejo.

3.2 Tendência linear (p_1): gradiente vertical da arquitetura do perfil

A maior interferência dos sistemas de manejo ocorre inicialmente na superfície, onde revolvimento, deposição de resíduos, cobertura vegetal, crescimento radicular e tráfego atuam diretamente sobre a organização estrutural e o carbono. A partir dessa interface, p_1 mostrou em que direção cada componente da arquitetura se projeta ao longo do perfil.

No Cerrado, os coeficientes lineares foram negativos para macroagregados ($-0,15$), DMP ($-0,076$) e carbono orgânico ($-0,082 \text{ g kg}^{-1}$). A coincidência dos sinais mostra que organização, estabilidade e carbono diminuíram no mesmo sentido com a profundidade. A vegetação natural, a cobertura permanente, o aporte contínuo de resíduos e a ausência de revolvimento favorecem uma superfície biologicamente ativa a partir da qual os três componentes estabelecem gradientes concordantes. Essa sincronia caracteriza uma arquitetura integrada, na qual a diferenciação vertical não resulta de ruptura mecânica entre as camadas.

O eucalipto apresentou comportamento semelhante, com p_1 negativos para macroagregados ($-0,06$), DMP ($-0,031$) e carbono orgânico ($-0,0664 \text{ g kg}^{-1}$). A menor magnitude dos gradientes em relação ao Cerrado indica uma diferenciação vertical mais suave, mas preserva a convergência das trajetórias. A baixa intensidade de revolvimento, a permanência da cobertura e a atuação prolongada do sistema radicular constituem mecanismos compatíveis com essa continuidade estrutural.

Na pastagem, macroagregados ($+0,25$) e DMP ($+0,050$) aumentaram em direção às camadas inferiores, enquanto o carbono orgânico diminuiu ($-0,0664 \text{ g kg}^{-1}$). A oposição das trajetórias mostra que organização e estabilidade estrutural não dependeram diretamente da distribuição quantitativa do carbono ao longo de todo o perfil. A longa permanência da *Brachiaria decumbens*, implantada inicialmente em 1976, torna a distribuição do sistema radicular um componente importante dessa interpretação. Crescimento, renovação e morte das raízes introduzem matéria orgânica diretamente em diferentes profundidades e podem sustentar processos de agregação e estabilização mesmo onde o carbono orgânico total apresenta menor concentração. A condição agrônômica degradada da pastagem, associada ao pastejo

intensivo e à ausência prolongada de correção e adubação, não implica, portanto, destruição equivalente de todos os componentes de sua arquitetura estrutural.

No plantio direto, o carbono apresentou o gradiente negativo mais acentuado ($p_1 = -0,103 \text{ g kg}^{-1}$), acompanhado pelo DMP ($-0,072$), enquanto os macroagregados apresentaram trajetória positiva ($+0,08$). O histórico predominantemente sem revolvimento favoreceu a manutenção dos resíduos culturais na superfície e, conseqüentemente, maior diferenciação entre superfície e subsuperfície. A oposição entre macroagregação e DMP mostra ainda que quantidade de agregados de maior tamanho e estabilidade desses agregados não respondem necessariamente da mesma forma à profundidade. A arquitetura do PD começa, assim, a revelar uma característica própria: conservação associada à ausência de revolvimento, porém acompanhada por forte estratificação vertical.

Na grade pesada, os macroagregados apresentaram p_1 positivo ($+0,09$), enquanto DMP ($-0,022$) e carbono orgânico ($-0,0667 \text{ g kg}^{-1}$) diminuíram com a profundidade. A disjunção deve ser interpretada considerando que a área avaliada já havia permanecido três anos em pousio sob B. decumbens após uma década de cultivo intensivo. A trajetória linear registra, portanto, simultaneamente a herança da mobilização anterior e a condição posterior sem revolvimento, impedindo que seu comportamento seja atribuído exclusivamente à ação direta da grade.

10

O arado de discos apresentou a maior divergência linear. Os macroagregados ($+0,45$) e o DMP ($+0,024$) aumentaram com a profundidade, enquanto o carbono orgânico diminuiu ($-0,076 \text{ g kg}^{-1}$). A forte resposta positiva da macroagregação indica maior alteração estrutural na porção superficial, com redução progressiva da influência direta do preparo à medida que aumenta a profundidade. O histórico mostra que essa mobilização foi recorrente, embora intercalada por períodos sem preparo. Assim, o perfil registra sucessivas intervenções capazes de romper e redistribuir a organização previamente estabelecida.

A tendência linear evidencia, portanto, duas formas distintas de diferenciação vertical. Cerrado e eucalipto mantêm gradientes convergentes, associados à baixa perturbação; pastagem e plantio direto apresentam disjunções construídas sob forte participação de processos biológicos; GP reúne efeitos de perturbação anterior e posterior cobertura; e AD apresenta a maior influência da mobilização mecânica sobre o gradiente estrutural. A direção de p_1 , isoladamente, não define conservação ou degradação: seu significado depende da convergência entre os indicadores e do processo de manejo que produziu a trajetória.

3.3 Tendência quadrática (p_2): curvatura da arquitetura do perfil

No Cerrado, sistema de referência e de maior conservação, macroagregados ($p_2 = -0,00013$) e DMP ($p_2 = -0,0012$) apresentaram componentes quadráticos praticamente nulos. Isso indica que a organização e a estabilidade estabelecidas nas camadas superficiais modificaram pouco a direção de suas trajetórias ao longo do perfil. O carbono orgânico apresentou maior componente quadrática ($+0,119 \text{ g kg}^{-1}$), mostrando que sua distribuição se ajustou em profundidade sem alteração equivalente dos componentes estruturais. Essa resposta sugere que a participação do carbono na estabilização estrutural não depende apenas de sua quantidade. Sob vegetação natural, o aporte contínuo e diversificado de resíduos, sua transformação e interação com a fração mineral podem favorecer formas mais estabilizadas de carbono e associações organominerais persistentes. Como as frações do carbono e seu grau de humificação não foram determinados, esse mecanismo constitui uma interpretação compatível com a continuidade estrutural observada, mas não pode ser demonstrado diretamente pelos dados.

No eucalipto, macroagregados ($+0,0191$), DMP ($+0,0066$) e carbono orgânico ($+0,023 \text{ g kg}^{-1}$) apresentaram curvaturas no mesmo sentido. Organização, estabilidade e componente orgânico modificaram conjuntamente suas trajetórias, indicando maior convergência entre esses componentes. A ausência de revolvimento recorrente, a permanência do sistema radicular e o aporte de resíduos constituem mecanismos compatíveis com essa resposta. O padrão, entretanto, não reproduz integralmente o Cerrado, pois a menor diversidade vegetal estabelece condições distintas de aporte orgânico e exploração radicular.

Na pastagem de *B. decumbens*, macroagregados ($p_2 = -0,035$) e carbono orgânico ($p_2 = -0,046 \text{ g kg}^{-1}$) apresentaram maior curvatura, enquanto o DMP permaneceu praticamente sem componente quadrático ($p_2 = -0,00072$). A organização dos macroagregados e a distribuição quantitativa do carbono modificaram, portanto, suas trajetórias sem alteração proporcional da estabilidade. A pequena contribuição de p_2 para o DMP expressa maior continuidade vertical da estabilidade estrutural, apesar da diferenciação dos demais componentes.

A longa permanência da gramínea fornece um mecanismo plausível para essa resposta. Diferentemente da ação dos implementos, concentrada na camada mobilizada, as raízes atuam em diferentes profundidades, aproximam partículas e microagregados e introduzem carbono

diretamente no perfil por renovação radicular e rizodeposição. Esses processos podem favorecer a atividade microbiana, a formação de agentes cimentantes e as interações organominerais. Como essas variáveis não foram determinadas diretamente, representam mecanismos explicativos, e não relações causais demonstradas. A pastagem evidencia, assim, que degradação agrônômica e degradação da arquitetura estrutural não são necessariamente equivalentes.

No plantio direto, macroagregados apresentaram p_2 negativo ($-0,0195$), enquanto DMP ($+0,012$) e carbono orgânico ($+0,047 \text{ g kg}^{-1}$) apresentaram curvaturas positivas. O histórico predominantemente sem revolvimento permite interpretar essa divergência como expressão de uma arquitetura conservacionista, porém estratificada. A permanência dos resíduos sobre a superfície protege os agregados e concentra parte importante do aporte recente de carbono, enquanto as raízes constituem a principal via biológica de atuação no interior do perfil.

Essa interpretação é compatível com mecanismos descritos para sistemas de plantio direto, nos quais raízes, rizodeposição, atividade microbiana e resíduos culturais participam da formação e estabilização dos agregados, enquanto a ausência de revolvimento favorece sua preservação. A ação radicular, entretanto, não é uniforme em profundidade e depende das condições físicas e químicas encontradas pelas raízes. Assim, a oposição entre a trajetória dos macroagregados e as trajetórias de DMP e carbono pode refletir a atuação espacialmente diferenciada dos aportes superficiais e radiculares. A conservação sob plantio direto não homogeneiza o perfil; permite que a diferenciação biologicamente construída entre as camadas permaneça expressa.

Na grade pesada, macroagregados ($p_2 = -0,0037$) e DMP ($+0,0014$) apresentaram componentes praticamente nulos, enquanto o carbono orgânico apresentou maior curvatura ($+0,028 \text{ g kg}^{-1}$). A interpretação desse comportamento exige considerar a trajetória da área: dez anos de sucessão soja-trigo sob preparo intensivo foram seguidos por três anos de pousio, com colonização por *B. decumbens*. A pequena contribuição quadrática dos indicadores estruturais mostra que, no momento da avaliação, organização e estabilidade apresentavam pouca modificação adicional de suas trajetórias em profundidade.

A interrupção do revolvimento cessou novas rupturas mecânicas e permitiu a retomada da atuação da cobertura e das raízes. A arquitetura encontrada não corresponde, portanto, à resposta imediata de um solo recém-gradeado, mas a uma condição pós-perturbação na qual processos biológicos passaram novamente a atuar sobre uma estrutura anteriormente

mobilizada. A maior curvatura do carbono mostra ainda que sua redistribuição quantitativa não ocorreu necessariamente de forma sincronizada com a reorganização estrutural.

No arado de discos, a macroagregação apresentou o maior componente quadrático negativo ($p_2 = -0,047$), enquanto DMP ($-0,0045$) e carbono orgânico ($+0,0085 \text{ g kg}^{-1}$) apresentaram curvaturas muito menores. Integrado ao forte p_1 positivo dos macroagregados, esse resultado mostra que a diferenciação estrutural estabelecida a partir da superfície não prossegue com intensidade constante: sua trajetória se modifica à medida que diminui a influência direta do preparo.

O histórico da área reforça essa interpretação. As mobilizações por discos ocorreram repetidamente, mas foram intercaladas por períodos de pousio e plantio direto. Cada retorno do preparo rompeu e redistribuiu unidades estruturais principalmente na camada alcançada pelo implemento. A forte curvatura da macroagregação, sem resposta equivalente do DMP e do carbono, evidencia que a organização dos agregados foi o componente mais diretamente sensível à ação mecânica. A arquitetura sob arado de discos caracteriza-se, portanto, pela transição entre a camada mecanicamente reorganizada e as porções progressivamente menos afetadas do perfil.

3.4 Tendência cúbica (p_3): inflexões da arquitetura em profundidade

13

No Cerrado, as componentes cúbicas negativas e de maior magnitude para macroagregados ($p_3 = -0,0077$) e DMP ($p_3 = -0,0027$) mostram que uma arquitetura altamente conservada não corresponde a uma estrutura uniforme em profundidade. A coincidência dos sinais indica que organização e estabilidade modificam conjuntamente suas trajetórias nas sucessivas transições entre camadas.

A diversidade da vegetação natural, a cobertura permanente e o aporte contínuo e diversificado de resíduos orgânicos constituem componentes fundamentais dessa arquitetura. Sistemas radiculares de diferentes espécies exploram posições e profundidades distintas, enquanto crescimento, morte e renovação das raízes introduzem matéria orgânica diretamente no perfil e estabelecem zonas diferenciadas de atividade biológica. A ausência de revolvimento permite que essas diferenciações sejam preservadas. Assim, as inflexões expressas por p_3 podem representar heterogeneidade vertical de uma arquitetura construída biologicamente e altamente conservada, e não descontinuidade decorrente de perturbação.

No eucalipto, macroagregados ($p_3 = -0,0036$) e DMP ($p_3 = -0,0019$) também apresentaram inflexões negativas e coincidentes. A concordância mostra que organização e estabilidade permanecem associadas, embora as inflexões sejam menos pronunciadas que no Cerrado. A baixa perturbação, permanência da cobertura florestal, aporte de resíduos e atuação prolongada das raízes são compatíveis com essa integração. A menor diversidade vegetal, entretanto, pode contribuir para uma arquitetura menos heterogênea que aquela mantida sob vegetação natural. Como distribuição radicular e qualidade dos resíduos não foram determinadas, essa relação constitui um mecanismo interpretativo possível, e não uma relação diretamente demonstrada.

Na pastagem, macroagregados ($p_3 = +0,0020$) e DMP ($p_3 = -0,0017$) apresentaram inflexões em sentidos opostos. A resposta reforça a distinção entre quantidade de macroagregados e estabilidade desses agregados. O comportamento é coerente com p_2 , no qual o DMP apresentou curvatura praticamente nula apesar da maior modificação das trajetórias de macroagregados e carbono. A estabilidade aparece, portanto, como componente relativamente persistente da arquitetura da pastagem.

A longa atuação da *B. decumbens* pode contribuir para essa persistência por meio do crescimento e renovação das raízes, rizodeposição e introdução de carbono em diferentes profundidades. A oposição das inflexões não deve, assim, ser equiparada à disjunção produzida mecanicamente nos sistemas preparados. Na pastagem, ela ocorre em um perfil submetido à atuação prolongada de processos biológicos, ainda que sob condições agronômicas de pastejo intensivo e ausência de adubação de manutenção.

No plantio direto, macroagregados apresentaram p_3 positivo ($+0,0030$), enquanto o DMP apresentou p_3 negativo ($-0,0030$). Essa oposição amplia a estratificação observada nas tendências anteriores. A ausência recorrente de revolvimento mantém os resíduos sobre a superfície e evita a homogeneização mecânica, enquanto a sucessão de arroz, soja, guandu e milho introduz resíduos e sistemas radiculares distintos. Consequentemente, organização e estabilidade podem modificar suas trajetórias de forma parcialmente independente entre as camadas.

A contribuição radicular é particularmente importante nesse sistema. Raízes, compostos liberados na rizosfera, atividade microbiana e manutenção dos resíduos culturais constituem mecanismos capazes de contribuir para a formação e estabilização dos agregados. Esses

processos fornecem uma base mecanística para compreender por que a estabilidade pode apresentar trajetória distinta da quantidade de macroagregados. A arquitetura do PD caracteriza-se, assim, como conservacionista, biologicamente estruturada e verticalmente estratificada: a divergência das inflexões não representa necessariamente fragmentação, mas pode expressar a preservação das diferenciações produzidas biologicamente quando as camadas deixam de ser periodicamente misturadas pelo preparo.

Na grade pesada, os macroagregados apresentaram componente cúbico próximo de zero ($p_3 = +0,00075$), enquanto o DMP permaneceu negativo ($p_3 = -0,0019$). Considerados juntamente com p_2 , esses valores mostram uma trajetória relativamente suavizada da organização estrutural no momento da avaliação. Os três anos de pousio sob B. decumbens, após uma década de cultivo intensivo, permitiram que ausência de revolvimento, cobertura e atuação radicular passassem a interferir sobre a estrutura anteriormente mobilizada. A GP registra, portanto, simultaneamente a herança da perturbação e a resposta do perfil após sua interrupção.

No arado de discos, o componente cúbico dos macroagregados foi positivo e expressivo ($p_3 = +0,0055$), enquanto o DMP apresentou valor positivo muito menor ($+0,00035$). Quando integrada ao forte p_1 positivo ($+0,45$) e ao p_2 negativo ($-0,047$) dos macroagregados, essa resposta caracteriza uma trajetória marcada por sucessivas modificações da organização estrutural entre as camadas. A macroagregação constitui, portanto, o componente que registra mais claramente a interferência mecânica na arquitetura vertical.

O contraste entre Cerrado e arado de discos é particularmente esclarecedor. Ambos apresentaram componentes cúbicos expressivos para macroagregados, mas com sinais opostos e, sobretudo, origens distintas. No Cerrado, as inflexões são compatíveis com a heterogeneidade vertical preservada pela diversidade vegetal, pelos diferentes sistemas radiculares e pelo aporte contínuo de resíduos; no AD, integram uma trajetória repetidamente modificada pela mobilização mecânica. A magnitude de p_3 não constitui, portanto, medida de conservação ou degradação: seu significado depende do processo que produziu a inflexão.

3.5 Síntese integrada da arquitetura do perfil

A integração de p_0 , p_1 , p_2 e p_3 mostrou que sistemas com condições médias semelhantes podem apresentar arquiteturas verticalmente distintas. A condição média, o gradiente, sua

curvatura e suas inflexões constituem dimensões complementares da organização do perfil e registram tanto a intensidade da perturbação quanto o tempo e a natureza dos processos que atuaram posteriormente sobre o solo.

Cerrado e eucalipto preservaram maior coerência entre organização e estabilidade, mas o Cerrado manteve maior heterogeneidade vertical associada à diversidade do sistema natural. A pastagem demonstrou que a atuação prolongada das raízes pode sustentar estabilidade estrutural mesmo diante de limitações agrônômicas do sistema. O plantio direto apresentou uma arquitetura conservacionista e estratificada, construída sem homogeneização mecânica e sob atuação conjunta de resíduos e sistemas radiculares. A grade pesada mostrou que a arquitetura registrada não depende apenas da perturbação passada, incorporando também a resposta posterior à interrupção do revolvimento. O arado de discos, por sua vez, apresentou a assinatura mais diretamente relacionada às sucessivas intervenções mecânicas, particularmente na trajetória dos macroagregados.

A arquitetura do Latossolo Vermelho pode, assim, ser interpretada como o arranjo vertical resultante da organização das partículas minerais e dos componentes orgânicos e da estabilidade das unidades estruturais formadas, construído pela interação entre processos físicos, biológicos e organominerais e modificado pelo manejo ao longo do tempo. Os coeficientes polinomiais não medem diretamente essa arquitetura; descrevem matematicamente as trajetórias dos indicadores empregados para interpretá-la. Macroagregados expressam a organização estrutural, o DMP sua estabilidade e o carbono orgânico um componente fundamental dos processos de formação e estabilização associados às interações biológicas e organominerais.

4. CONCLUSÕES

O emprego das tendências polinomiais p_0 , p_1 , p_2 e p_3 permitiu identificar e diferenciar a arquitetura do perfil do Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo, expressando sua condição média, direção, curvatura e inflexões em profundidade.

A integração de macroagregados, diâmetro médio ponderado e carbono orgânico mostrou que sistemas com condições médias semelhantes podem apresentar arquiteturas distintas ao longo do perfil, revelando respostas não identificadas pela análise isolada ou pela simples comparação das médias desses indicadores.

Os sistemas de menor perturbação mecânica mantiveram arquiteturas mais conservadas, com maior integração entre organização e estabilidade estrutural, enquanto o revolvimento recorrente modificou a organização e sua trajetória vertical. Pastagem e plantio direto demonstraram que a conservação estrutural pode ocorrer sob diferentes padrões de diferenciação em profundidade.

O histórico de manejo permaneceu registrado na arquitetura do perfil: a grade pesada apresentou condição estrutural modificada após a interrupção do revolvimento e o período de pousio, enquanto o arado de discos apresentou a maior expressão da interferência mecânica sobre a organização vertical dos macroagregados.

A arquitetura do Latossolo Vermelho refletiu a natureza, a intensidade, a duração e a sucessão das intervenções de manejo, demonstrando que conservação estrutural não significa uniformidade do perfil e que a diferenciação vertical entre camadas não constitui, isoladamente, evidência de degradação. As diferentes arquiteturas evidenciam o solo como um sistema dinâmico, em contínua transformação e ajuste às condições ambientais e às intervenções de manejo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.03.005.

COLWELL, J. D. *Computations for studies of soil fertility and fertilizer requirements*. Canberra: CSIRO Division of Soils, Commonwealth Agricultural Bureaux, 1978. 297 p.

CORAZZA, E. J.; SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, n. 2, p. 425-432, 1999. DOI: 10.1590/S0100-06831999000200025.

FERREIRA, E. A. B.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C.; RAMOS, M. L. G. Dinâmica do carbono da biomassa microbiana em cinco épocas do ano em diferentes sistemas de manejo do solo no Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 1625-1635, 2007.

HARTMANN, M.; SIX, J. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 4, p. 4-18, 2023. DOI: 10.1038/s43017-022-00366-w.

OADES, J. M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, v. 56, n. 1-4, p. 377-400, 1993. DOI: 10.1016/0016-7061(93)90123-3.

PEREIRA, I. S. da. *Efeito de diferentes sistemas de manejo na distribuição de macro e microagregados e nos teores de carbono orgânico em um Latossolo Vermelho-Escuro na região dos Cerrados*. 1997. 160 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Agrônômica, Brasília, DF, 1997.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, v. 241, p. 155–176, 2002. DOI: 10.1023/A:1016125726789.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. *Geoderma*, v. 127, n. 1–2, p. 168–173, 2005. DOI: 10.1016/j.geoderma.2005.02.010.